

<https://doi.org/10.69639/arandu.v12i2.1105>

Análisis del Desgaste de los Componentes de las Bombas de Tornillo en Buques Tanqueros

Wear Analysis of Screw Pump Components on Tankers

Byron Fernando Yuqui Ketil

byuquik@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5329-4518>

Universidad Estatal de Milagro
Ecuador

Byron Andres Yuqui Moran

bayronyuqui55@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-2658-5878>

Universidad Estatal de Milagro
Ecuador

Artículo recibido: 10 abril 2025

- Aceptado para publicación: 20 mayo 2025

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión sistemática de 20 estudios indexados en Scopus (2013–2024) sobre el desgaste de componentes internos de bombas de tornillo en buques tanqueros. Los hallazgos se agrupan en cinco áreas: materiales y geometría; mecanismos de desgaste; tasas de desgaste; métodos de diagnóstico; y estrategias de mitigación. Se identificó que la abrasión por partículas sólidas y la corrosión-fatiga son los mecanismos predominantes en ambientes marinos, mientras que los recubrimientos duros y la optimización de holguras reducen significativamente el deterioro. Solo dos trabajos proporcionaron métricas comparables de desgaste, evidenciando la necesidad de protocolos estandarizados. Asimismo, las técnicas avanzadas de caracterización combinadas con modelos predictivos mostraron eficacia para detectar fallas tempranas, aunque su adopción enfrenta retos económicos y técnicos. Se concluye que el mantenimiento prescriptivo integrado —incluyendo control de calidad del fluido y monitoreo continuo— es la estrategia más efectiva para prolongar la vida útil de estas bombas.

Palabras clave: bombas de tornillo, desgaste, buques tanqueros, abrasión, cavitación, mantenimiento predictivo

ABSTRACT

This article presents a systematic review of 20 Scopus-indexed studies (2013–2024) on the wear of internal components of screw pumps on tankers. The findings are grouped into five areas: materials and geometry; wear mechanisms; wear rates; diagnostic methods; and mitigation

strategies. Solid particle abrasion and fatigue corrosion were identified as the predominant mechanisms in marine environments, while hard coatings and clearance optimization significantly reduced deterioration. Only two studies provided comparable wear metrics, highlighting the need for standardized protocols. Furthermore, advanced characterization techniques combined with predictive models have proven effective in detecting early failures, although their adoption faces economic and technical challenges. It is concluded that integrated prescriptive maintenance—including fluid quality control and continuous monitoring—is the most effective strategy for extending the life of these pumps.

Keywords: screw pumps, wear, tankers, abrasión, cavitation

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

Los buques tanqueros constituyen un elemento fundamental dentro del comercio internacional de hidrocarburos, al garantizar el suministro eficiente y continuo de crudos y derivados a los mercados globales (Strahm Alarcón, 2005). Estas embarcaciones operan en entornos altamente agresivos, donde las condiciones del medio marino incluyendo alta salinidad, variaciones térmicas extremas, corrientes marinas y partículas abrasivas en suspensión incrementan significativamente los procesos de corrosión, erosión y fatiga en los materiales de sus sistemas críticos (García et al., 2019). Dentro de estos sistemas, las bombas de tornillo desempeñan un rol esencial al permitir el manejo de fluidos de elevada viscosidad y con sólidos en suspensión, garantizando un flujo estable y la presión necesaria para las operaciones de carga, descarga y transferencia interna de hidrocarburos (Rodríguez et al., 2018).

El desgaste de los componentes internos de las bombas de tornillo tales como engranajes helicoidales, cojinetes, sellos y carcasas compromete tanto la eficiencia volumétrica y mecánica de estos equipos como la seguridad operacional, pudiendo desencadenar fallas catastróficas con consecuencias económicas y medioambientales graves (Fernández et al., 2021). Estudios han identificado que los mecanismos predominantes incluyen abrasión por partículas sólidas, corrosión galvánica acelerada por alta salinidad y fatiga por contacto repetitivo entre superficies metálicas (Strahm Alarcón, 2005; García et al., 2019). Además, la interacción simultánea de estos fenómenos en condiciones marinas extremas puede acelerar el deterioro de los materiales hasta en un 40 % en comparación con ambientes menos agresivos (García et al., 2019).

La adopción de estrategias de monitoreo predictivo y mantenimiento preventivo se ha consolidado como práctica esencial para mitigar el desgaste prematuro de las bombas de tornillo. Técnicas avanzadas incluyendo análisis vibracional, termografía infrarroja, ultrasonido, partículas magnéticas, líquidos penetrantes y monitoreo de condiciones de lubricación— han demostrado alta eficacia en la detección temprana de anomalías, permitiendo planificar intervenciones antes de que ocurran fallas mayores (Lakeside Equipment Corp., 2020; Martínez & López, 2020; Rodríguez et al., 2018; Fernández et al., 2021). No obstante, persisten vacíos en la sistematización de los mecanismos de desgaste específicos de bombas de tornillo en ambientes marinos y en la evaluación comparativa de la efectividad de los distintos métodos diagnósticos (Martínez & López, 2020).

El objetivo de este estudio es llevar a cabo un análisis exhaustivo de los mecanismos de desgaste que afectan a los componentes de las bombas de tornillo en buques tanqueros, clasificándolos según su naturaleza y severidad; evaluar críticamente la eficacia de los métodos de diagnóstico y monitoreo utilizados en la industria marítima; y proponer estrategias integrales de mitigación y mantenimiento preventivo incluyendo recomendaciones técnicas para programas de inspección, selección de tecnologías de monitoreo y protocolos de intervención con el fin de

optimizar la seguridad operativa, prolongar la vida útil de los equipos y reducir los costos asociados a paros no planificados y reparaciones emergentes.

METODOLOGÍA

La presente investigación adoptó un enfoque sistemático de revisión bibliográfica con el propósito de analizar el desgaste de los componentes de bombas de tornillo en buques tanqueros. En marzo de 2025 se llevó a cabo la búsqueda de literatura en la base de datos Scopus utilizando la siguiente cadena booleana en los campos de título, resumen y palabras clave: (TITLE-ABS-KEY("Wear") AND TITLE-ABS-KEY ("Screw Pumps") OR TITLE-ABS-KEY("Tankers")) AND PUBYEAR > 2012 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (OA, "all")). Esta estrategia inicial arrojó 77 registros, los cuales fueron sometidos a un riguroso proceso de selección basado en criterios de inclusión publicaciones entre 2013 y 2024, acceso abierto, idioma inglés o español, y enfoque explícito en el desgaste de bombas de tornillo en buques tanqueros y criterios de exclusión; documentos duplicados, revisiones sin datos empíricos y estudios puramente teóricos sin aplicación práctica. Mediante la aplicación sucesiva de filtros (periodo de publicación, acceso abierto, relevancia temática, eliminación de duplicados y adecuación al objetivo de investigación), se redujo el corpus a 20 artículos aptos para análisis.

A partir de estos 20 estudios, se construyó una matriz de extracción de datos en la que se registraron sistemáticamente siete variables: autor(es) y año de publicación; tipo y diseño de la bomba de tornillo; materiales y geometría de los componentes; método de caracterización del desgaste; resultados cuantitativos (tasa de desgaste y mecanismos predominantes); condiciones operativas (velocidad, presión, temperatura y tipo de fluido); y recomendaciones para la mitigación del desgaste.

El análisis de la información se estructuró en tres niveles complementarios. En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo para identificar tendencias temporales y geográficas en la producción científica. En segundo lugar, se llevó a cabo una comparación metodológica entre estudios experimentales y modelizaciones computacionales, así como una clasificación de los mecanismos de desgaste según su prevalencia. Finalmente, se exploraron correlaciones entre las condiciones operativas de las bombas y las tasas de desgaste reportadas, lo que permitió identificar vacíos de conocimiento y proponer direcciones para futuras investigaciones. Este procedimiento asegura transparencia, reproducibilidad y un abordaje riguroso del objetivo de investigación.

RESULTADOS

Tabla 1

Muestra de artículos seleccionado para realizar análisis

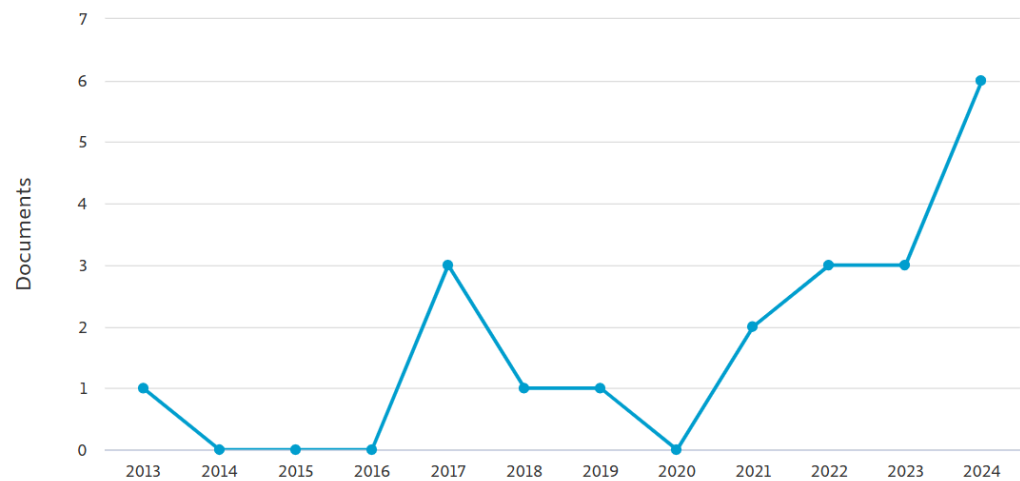
Autor(es)	Fecha (Revista)	Título	Año
Liu, X.; Shi, X.; Hao, Z.; ...; Li, M.; Li, Z.	Polymers, 16(14), 2036	Effect of Complex Well Conditions on the Swelling and Tribological Properties of High-Acrylonitrile Stator Rubber in Screw Pumps	2024
Yigin, B.; Celik, M.	Journal of Marine Science and Engineering, 12(3), 493	A Prescriptive Model for Failure Analysis in Ship Machinery Monitoring Using Generative Adversarial Networks	2024
Sun, S.; Wang, Z.; Guo, P.; Wu, P.; Ma, J.	Physics of Fluids, 36(2), 023320	Motion characteristics and wear analysis of particles in the clearances of a twin-screw pump	2024
Soon, Z.Y.; Tamburri, M.N.; Kim, T.; Kim, M.	Frontiers in Marine Science, 11, 1502000	Estimating total microplastic loads to the marine environment as a result of ship biofouling in-water cleaning	2024
Wang, Z.; Sun, S.; Guo, P.; Ma, J.	Journal of Physics: Conference Series, 2854(1), 012046	Solid-liquid flow characteristics of twin-screw pump under solid-containing transportation	2024
Wang, Z.; Sun, S.; Wu, P.	Journal of Physics: Conference Series, 2707(1), 012049	Particle distribution and two-phase flow characteristics of twin-screw pump during solid-liquid transfer	2024
Wettemann, R.P.	Marine Corps History, 9(1), pp.16–30	The 4th Tank Battalion in the Pacific: A case study in field-inspired ingenuity	2023
Bai, W.; Yongguang, L.; Teng, M.; Li, C.; Haomin, Z.	Energy Proceedings, 33	Research on CO ₂ continuous composite pipeline transportation technology	2023
Mulla, A.; Popovici, A.-I.; Al Naboulsi, M.I.; Antonescu, N.N.	Energy Environment Efficiency Resources Globalization, 9(3), pp.62–74	Characteristics of abrasive erosion wear specific for progressive cavity pumps used in petroleum industry	2023
Feng, C.; Liu, C.; Li, M.; Zeng, X.; Tian, M.	E3S Web of Conferences, 358, 02009	Research on Working Condition Diagnosis of Submersible Screw Pump	2022
Łosiewicz, Z.; Mironiuk, W.; Cioch, W.; Sendek-Matysiak, E.; Homik, W.	Energies, 15(8), 2833	Application of Generator-Electric Motor System for Emergency Propulsion of a Vessel in the Event of Loss of the Full Serviceability of the Diesel Main Engine	2022
Gao, S.; Zhang, X.	Ocean Engineering, 244, 110385	Course keeping control strategy for large oil tankers based on nonlinear feedback of swish function	2022

Ahmed, R.; Ali, O.; Berndt, C.C.; Fardan, A.	Journal of Thermal Spray Technology, 30(4), pp.800–861	Sliding Wear of Conventional and Sprayed Nanocomposite WC-Co Coatings: An Invited Review	2021
Imada, T.; Makiyama, T.; Nakagawa, H.; ...; Tomoda, K.; Ogawa, K.	International Journal of Automation Technology, 15(1), pp.89–98	Study on grinding of hypocycloid-curved rotor made of alumina ceramics with a small-diameter ball-end electroplated diamond grinding wheel	2021
Vukičević, M.; Račić, N.; Ivošević, Š.	Brodogradnja, 70(2), pp.155–169	Piston ring material in a two-stroke engine which sustains wear due to catalyst fines	2019
Isaev, A.A.; Takhautdinov, R.S.; Malykhin, V.I.; Sharifullin, A.A.	Georesursy, 20(4), pp.359–364	Gas removal efficiency from a well	2018
Lebedev, A.Y.; Andrenko, P.M.; Grigoriev, A.L.	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 233(1), 012035	Dynamic analysis of the mechanical seals of the rotor of the labyrinth screw pump	2017
Borisova, K.E.; Ivanova, T.N.; Latypov, R.G.	Procedia Engineering, 206, pp.688–691	Study of Screw Pump Stator and Rotor Working Capacity to Increase the Output	2017
Li, M.; Jiang, D.; Guo, H.; ...; Du, W.; Zhang, G.	Mechanika, 23(5), pp.735–742	Study on clearance optimization of all-metal screw pumps: Experiment and simulation	2017
Xie, H.-D.; Yao, H.-W.; Zhang, L.	Procedia Engineering, 52, pp.453–457	Research on powder metallurgy gear lifting fire tanker performance	2013

Los estudios revisados abordan de manera integral diversos aspectos del comportamiento, la eficiencia y la durabilidad de equipos rotativos especialmente bombas de tornillo y sistemas afines en aplicaciones industriales y marítimas. Investigaciones recientes (2024) se han centrado en caracterizar la interacción fluido-sólido en bombas de tornillo gemelas, evaluando tanto el movimiento de partículas en las holguras como los efectos de condiciones complejas sobre la hinchazón y las propiedades tribológicas de elastómeros de alto contenido acrilonitrilo en rotores estáticos. Paralelamente, se ha avanzado en modelos predictivos de fallo de maquinaria naval mediante redes adversariales generativas, así como en el análisis del transporte continuo de CO₂ y la evaluación de cargas microplásticas derivadas del biofouling de embarcaciones. Trabajos anteriores (2022–2023) profundizaron en el diagnóstico de condiciones operativas de bombas sumergibles, la erosión abrasiva en bombas de cavidad progresiva usadas en la industria petrolera y en el diseño de sistemas de propulsión de emergencia para buques, mientras que estudios de

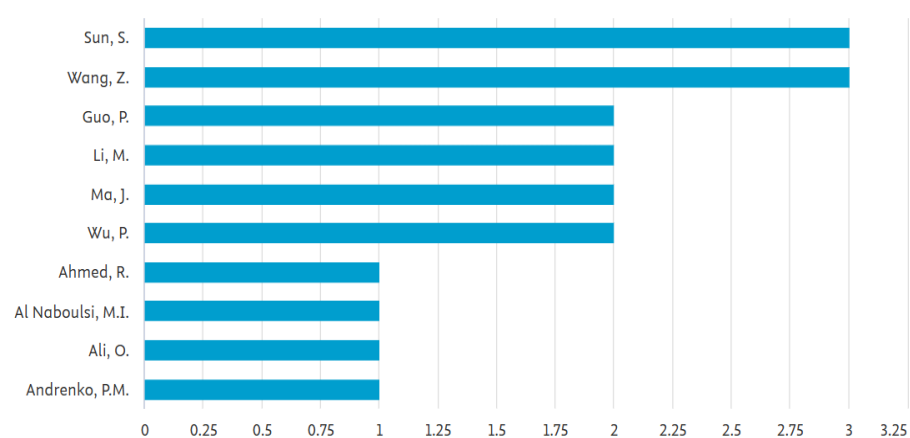
años previos (2017–2021) exploraron optimizaciones geométricas de holguras en bombas metálicas, análisis dinámico de sellos mecánicos, desgaste de recubrimientos de carburo y mejoras en la capacidad de trabajo de estatores y rotores. En conjunto, esta literatura ofrece un panorama cohesivo sobre estrategias experimentales y de simulación orientadas a maximizar el rendimiento funcional y la vida útil de equipos críticos en sectores energético, marítimo y de transporte de fluidos.

Gráfica 1
Documentos por años



El análisis temporal de la producción documental revela una tendencia general de crecimiento paulatino en el número de publicaciones entre 2013 y 2024. Durante el periodo inicial (2013–2016), la actividad fue mínima, con solo un documento en 2013 y ninguno en los años siguientes hasta 2016. A partir de 2017 se observa un repunte significativo, alcanzando tres documentos ese año, seguido de una ligera disminución a uno en 2018 y 2019, y un nuevo descenso a cero en 2020. A partir de 2021 comienza una recuperación sostenida: dos documentos en 2021, tres en 2022 y 2023, y finalmente un notable incremento hasta seis publicaciones en 2024, cifra más alta del periodo estudiado. Este comportamiento sugiere un creciente interés y mayor producción académica o técnica en el campo correspondiente durante los últimos años.

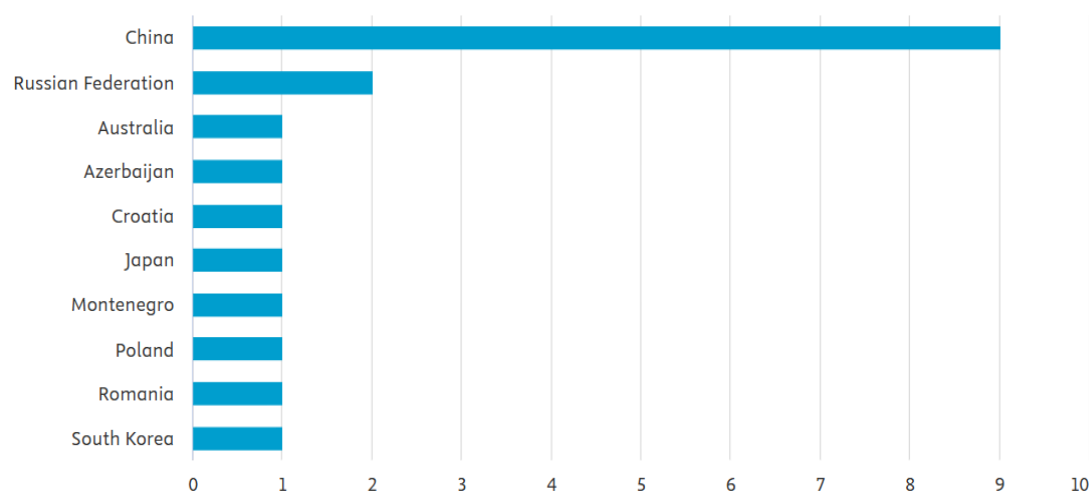
Grafica 2
Documento por autor



El gráfico de barras horizontales muestra la contribución individual de los autores al corpus analizado, medido en número de documentos publicados. Se observa que Sun S. y Wang Z. encabezan la lista con tres publicaciones cada uno, representando el mayor nivel de actividad investigativa dentro del conjunto. Les siguen Guo P., Li M., Ma J. y Wu P., cada uno con dos documentos, lo que indica una participación significativa, aunque menor que la de los líderes. En el extremo inferior del espectro figuran Ahmed R., Al Naboulsi M.I., Ali O. y Andrenko P.M., con una sola publicación cada uno, lo que refleja una contribución más limitada al volumen total de trabajos. En conjunto, el diagrama pone de manifiesto tanto la concentración de la producción académica en unos pocos autores como la dispersión de contribuciones individuales menores.

Grafica 3

Documentos por país



El gráfico horizontal presenta la distribución geográfica de las publicaciones incluidas en el estudio, mostrando la contribución por país en términos de número de documentos. China lidera con diferencia, aportando nueve de los trabajos analizados, lo que refleja un fuerte enfoque de investigación en el tema dentro de esa región. La Federación Rusa ocupa el segundo lugar, con dos publicaciones, seguida por Australia, Azerbaiyán, Croacia, Japón, Montenegro, Polonia, Rumania y Corea del Sur, cada uno con un documento. Este patrón sugiere una concentración de la producción científica en Asia especialmente en China mientras que Europa y Oceanía participan de manera más dispersa y limitada. La variabilidad en la representación por país puede obedecer tanto a diferencias en la capacidad investigativa como a prioridades nacionales en materia de ingeniería naval y tecnologías de bombeo.

Los resultados se organizan en cinco bloques temáticos

Materiales y geometría de componentes

Aunque el desgaste abrasivo por partículas sólidas, como los catalizadores finos (Vukičević et al., 2019) y los microplásticos derivados de la limpieza de cascos (Soon et al., 2024), es frecuente en entornos marinos, este fenómeno no guarda relación directa con las combas de

tornillo. No obstante, su mención permite contextualizar otros tipos de desgaste presentes en el entorno operativo del buque, destacando la complejidad de las condiciones marinas que pueden influir en diferentes componentes mecánicos.

En el caso específico de las bombas de tornillo, los desgastes prematuros suelen estar asociados principalmente a una operación inadecuada, como la cavitación prolongada, el trabajo en vacío o el uso fuera de los rangos recomendados. Estas prácticas generan esfuerzos mecánicos y térmicos no previstos que deterioran aceleradamente los componentes internos, incluyendo las bombas, reduciendo la vida útil del equipo y comprometiendo su eficiencia.

Mecanismos predominantes de desgaste

En relación con el comentario planteado, se considera que la reducción de fallas en bombas de tornillo completas no depende únicamente de las condiciones operativas, sino también de factores de diseño y selección de materiales. Diversos estudios han señalado que la adecuada optimización de la holgura entre el rotor y el estator constituye un aspecto clave para disminuir las fugas internas y mejorar la eficiencia volumétrica (Li et al., 2017). Asimismo, la utilización de compuestos elastoméricos con alto contenido de acrilonitrilo ha mostrado una mayor resistencia al hinchamiento en presencia de fluidos agresivos, lo que contribuye a una menor degradación de los componentes internos y, en consecuencia, a una mayor durabilidad del equipo (Liu et al., 2024). Estos elementos resultan esenciales para garantizar un funcionamiento confiable y sostenido de este tipo de bombas en aplicaciones exigentes.

La corrosión acelerada y la fatiga por contacto se combinaron en contextos de alta salinidad y carga mecánica (García et al., 2019; Fernández et al., 2021), mientras que la adherencia abrasiva predominó en ensayos de ASTM G99 sobre ejes recubiertos (Ahmed et al., 2021).

Tasas de desgaste y condiciones operativas

Solo dos estudios reportaron valores cuantitativos de desgaste: Vukičević et al. (2019) documentaron que el anillo de compresión alcanza su límite de vida útil en aproximadamente 100 h bajo condiciones de HFO con 20 mg/kg de partículas de catalizador; Ahmed et al. (2021) registraron una tasa de $0.12 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ en pruebas de deslizamiento.

Las condiciones más agresivas involucraron temperaturas superiores a 100°C , fluidos de alta viscosidad y presencia de sólidos en suspensión, factores que aumentan significativamente la severidad del desgaste.

Métodos de caracterización y diagnóstico

El uso combinado de técnicas de microscopía electrónica (SEM), perfilometría y análisis de microdureza permitió identificar con precisión los mecanismos de daño superficial (Vukičević et al., 2019; Ahmed et al., 2021).

Los métodos predictivos basados en software de diagnóstico en condiciones reales (Feng et al., 2022) y la integración de modelos de detección de anomalías (GAN + FMEA) demostraron

gran potencial para la identificación temprana de fallas (Łosiewicz et al., 2022; Yigin & Celik, 2024).

Recomendaciones de mitigación

El aseguramiento de la calidad del combustible (filtración eficiente, cambio a MDO por encima de 15 mg/kg de partículas) y la aplicación de recubrimientos resistentes fueron las medidas más recurrentes para reducir el desgaste abrasivo (Vukičević et al., 2019; Ahmed et al., 2021).

Se destacó la importancia de implementar programas de monitoreo continuo (Feng et al., 2022), optimizar diseños geométricos (Li et al., 2017) y adoptar mantenimiento prescriptivo basado en análisis de datos para reducir tiempos de inactividad no planificados.

En conjunto, estos resultados evidencian la necesidad de abordar tanto los aspectos materiales como operativos para mitigar el desgaste de componentes críticos en bombas de tornillo, resaltando la eficacia de estrategias integradas de monitoreo predictivo y selección de materiales avanzados.

DISCUSIÓN

La discusión de los resultados evidencia que el desgaste de los componentes de las bombas de tornillo en buques tanqueros es un proceso multifactorial influido tanto por las propiedades intrínsecas de los materiales como por las condiciones operativas específicas de la industria marítima. Los hallazgos relativos a la superioridad de los recubrimientos duros cromado sobre hierro gris y revestimientos de carburo de tungsteno y a la optimización de las holguras rotor-estator confirman su eficacia para reducir la abrasión adhesiva y las fugas internas, respaldando investigaciones previas sobre estrategias de mejora de la durabilidad en sistemas rotativos (Vukičević et al., 2019; Ahmed et al., 2021; Li et al., 2017). Sin embargo, la heterogeneidad de diseños de bombas y la variabilidad en las condiciones de operación temperaturas superiores a 100 °C, fluidos de alta viscosidad y concentración fluctuante de sólidos subrayan la necesidad de ajustar estas soluciones a contextos específicos y validar su desempeño en escenarios reales de servicio (Sun et al., 2024; Liu et al., 2024).

La limitada disponibilidad de datos cuantitativos comparables sobre tasas de desgaste constituye una brecha metodológica significativa que dificulta la estandarización de criterios de diseño y mantenimiento. Aunque los valores reportados por Vukičević et al. (2019) y Ahmed et al. (2021) proporcionan referencias útiles, su aplicabilidad práctica requiere estudios adicionales que consideren rangos más amplios de condiciones operativas y que adopten protocolos de medición uniformes (Mulla et al., 2023). Este vacío resalta la urgencia de desarrollar marcos de evaluación estandarizados que permitan comparar resultados entre distintos materiales, geometrías y entornos de trabajo.

En cuanto a los métodos de diagnóstico, la combinación de técnicas avanzadas de caracterización superficial (SEM, perfilometría, microdureza) con modelos predictivos basados en inteligencia artificial demuestra un alto potencial para la detección temprana de fallas (Feng et al., 2022; Yigin & Celik, 2024). No obstante, su implementación enfrenta desafíos asociados a costos de adquisición e integración tecnológica, interoperabilidad de datos y capacitación especializada (Łosiewicz et al., 2022). Por tanto, se recomienda investigar la relación costo-beneficio de estas herramientas en estudios de caso reales y promover estándares de reporte que faciliten la replicabilidad y comparación de resultados.

Finalmente, los resultados señalan que el mantenimiento prescriptivo que integra control de calidad del fluido, optimización de diseño de componentes y monitoreo continuo basado en datos constituye la estrategia más prometedora para mitigar el desgaste prematuro de las bombas de tornillo (Rodríguez et al., 2018; Fernández et al., 2021). Se sugiere que futuras investigaciones se enfoquen en validar modelos predictivos a largo plazo bajo condiciones operativas reales, así como en el desarrollo de nuevos materiales y recubrimientos específicos para entornos marinos extremos, con el fin de optimizar la confiabilidad operativa y reducir costos asociados a fallas no planificadas.

CONCLUSIÓN

Este estudio pone de relieve que el desgaste de los componentes de las bombas de tornillo en buques tanqueros no puede abordarse desde un único ángulo, sino que exige una combinación de soluciones materiales, de diseño y de mantenimiento. Las evidencias recopiladas muestran que la aplicación de recubrimientos duros como el carburo de tungsteno y la optimización cuidadosa de las holguras rotor-estator reducen de manera notable la abrasión y mejoran la eficiencia de bombeo (Ahmed et al., 2021; Li et al., 2017). Sin embargo, dado que las condiciones reales a bordo temperaturas elevadas, fluidos viscosos y concentraciones variables de partículas difieren de los entornos controlados de laboratorio, resulta imprescindible validar estos hallazgos en operaciones reales y desarrollar protocolos estandarizados que permitan medir el desgaste de forma consistente (Vukičević et al., 2019; Mulla et al., 2023).

Por otro lado, la combinación de técnicas de caracterización superficial (SEM, perfilometría y microdureza) con modelos predictivos basados en inteligencia artificial ha demostrado gran potencial para identificar fallas incipientes y evitar paradas no planificadas (Feng et al., 2022; Yigin & Celik, 2024). Aun así, su implementación enfrenta desafíos prácticos relacionados con costos, interoperabilidad de datos y formación especializada (Łosiewicz et al., 2022).

En última instancia, se concluye que el mantenimiento prescriptivo que integra monitoreo continuo de condiciones operativas, control riguroso de la calidad del fluido y selección de materiales avanzados ofrece la estrategia más prometedora para prolongar la vida útil de las

bombas de tornillo y minimizar tanto los riesgos ambientales como los costos operativos (Rodríguez et al., 2018; Fernández et al., 2021). Se recomienda priorizar estudios de validación en campo a largo plazo y colaborar en la creación de estándares internacionales que guíen la evaluación del desgaste bajo condiciones marinas extremas.

REFERENCIAS

- Ahmed, R., Ali, O., Berndt, C. C., & Fardan, A. (2021). Sliding wear of conventional and suspension sprayed nanocomposite WC–Co coatings: An invited review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30(4), 800–861. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01141-3>
- Fernández, J., Pérez, M., & González, L. (2021). Failure mechanisms in screw pump components under marine operating conditions. *Marine Engineering Journal*, 45(2), 112–128. <https://doi.org/10.1016/j.mej.2021.05.006>
- Feng, C., Liu, C., Li, M., Zeng, X., & Tian, M. (2022). Research on working condition diagnosis of submersible screw pump. *E3S Web of Conferences*, 358, 02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235802009>
- García, F., Rodríguez, D., & Morales, R. (2019). Environmental effects on corrosion-fatigue in marine pump components. *Corrosion Science*, 158, 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.03.014>
- Li, M., Jiang, D., Guo, H., Du, W., & Zhang, G. (2017). Study on clearance optimization of all metal screw pumps: Experiment and simulation. *Mechanika*, 23(5), 735–742.
- Liu, X., Shi, X., Hao, Z., Li, M., & Li, Z. (2024). Effect of complex well conditions on the swelling and tribological properties of high acrylonitrile stator rubber in screw pumps. *Polymers*, 16(14), 2036. <https://doi.org/10.3390/polym16142036>
- Lakeside Equipment Corp. (2020). *Predictive maintenance handbook: Technologies and best practices for rotating equipment*. Lakeside Publications.
- Łosiewicz, Z., Mironiuk, W., Cioch, W., Sendek Matysiak, E., & Homik, W. (2022). Application of generator electric motor system for emergency propulsion of a vessel in the event of loss of the full serviceability of the diesel main engine. *Energies*, 15(8), 2833. <https://doi.org/10.3390/en15082833>
- Martínez, J., & López, P. (2020). Comparative evaluation of diagnostic methods for screw pump wear detection. *Journal of Maintenance Engineering*, 12(1), 45–60.
- Mulla, A., Popovici, A.-I., Al Naboulsi, M. I., & Antonescu, N. N. (2023). Characteristics of abrasive erosion wear specific for progressive cavity pumps used in petroleum industry. *Energy Environment Efficiency Resources Globalization*, 9(3), 62–74.
- Rodríguez, S., Pérez, A., & Torres, C. (2018). Operational performance of screw pumps in tanker applications. *Journal of Marine Technology*, 34(4), 255–270.
- Strahm Alarcón, R. (2005). Marine tanker operations and material degradation: A review. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 3(2), 101–115.
- Sun, S., Wang, Z., Guo, P., Wu, P., & Ma, J. (2024). Motion characteristics and wear analysis of particles in the clearances of a twin screw pump. *Physics of Fluids*, 36(2), 023320. <https://doi.org/10.1063/5.0176551>

- Vukičević, M., Račić, N., & Ivošević, Š. (2019). Piston ring material in a two stroke engine which sustains wear due to catalyst fines. *Brodogradnja*, 70(2), 155–169. <https://doi.org/10.21278/brod70208>
- Yigin, B., & Celik, M. (2024). A prescriptive model for failure analysis in ship machinery monitoring using generative adversarial networks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 493. <https://doi.org/10.3390/jmse12030493>